



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Túnel mixto para Ferrocarriles y Automóviles entre Horta y el Vallés Occidental

Treball realitzat per:

Cristina Aguado Díaz

Dirigit per:

Javier Pablo Ainchil Lavin

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 21 de setembre de 2017

Departament d'Enginyeria de la Construcció

TREBALL FINAL DE MÀSTER

ÍNDICE DE DOCUMENTOS

DOCUMENTO 1: Memoria y anejos

DOCUMENTO 2: Planos

DOCUMENTO 3: Pliego de prescripciones técnicas

DOCUMENTO 4: Presupuesto

DOCUMENTO 1

MEMORIA Y ANEJOS

MEMORIA

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho estas primeras líneas para dedicar unas palabras de agradecimiento a todos aquellos que han hecho posible que este trabajo pudiera llevarse a cabo.

En primer lugar a mi tutor, Javier Ainchil, por proponerme este proyecto. Por la información que me ha proporcionado y por la disponibilidad en todo momento de ayudar en lo necesario.

Al Profesor Gonzalo Ramos, por la ayuda recibida acerca del cálculo de túneles.

A mis padres y mi pareja, por el apoyo incondicional en los momentos más difíciles. Sin ellos no habría sido posible.

ÍNDICE

1.	MARCO DEL PROYECTO	6
2.	RAZÓN DE SER Y ANTECEDENTES	7
2.1.	Eje ferroviario.....	7
2.2.	Eje viario.....	8
3.	DATOS DEL PROYECTO.....	10
4.	OBJETO DEL PROYECTO.....	10
5.	CONDICIONANTES GENERALES	11
5.1.	Marco geográfico.....	11
5.2.	Topografía	12
5.3.	Geología y geotecnia.....	13
5.4.	Climatología	13
5.5.	Hidrología y drenaje.....	14
5.6.	Entorno ambiental.....	14
6.	ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	15
6.1.	Descripción del trazado	15
6.2.	Estudio de alternativas de trazado.....	15
7.	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA	19
7.1.	Descripción general	19
7.2.	Trazado	19
7.3.	Túnel	19
7.3.1.	Características del eje viario.....	20
7.3.2.	Características del eje ferroviario.....	20
7.4.	Estructuras	21
7.4.1.	Muros de contención de tierras	21
7.4.2.	Pozos de ataque de la tuneladora	22
7.4.3.	Viaductos.....	22
7.4.4.	Solución en pérgola – bifurcación.....	23
7.5.	Tráfico.....	23
7.6.	Firmes y pavimento	24
7.7.	Plataforma y superestructura.....	24
7.8.	Movimientos de tierras.....	25
7.9.	Afectaciones sobre la movilidad	25
8.	ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL	25
9.	GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DE DEMOLICIÓN	26
10.	EXPROPIACIONES Y OCUPACIONES TEMPORALES	26
11.	ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD	26
12.	PLAN DE LA OBRA	27

13. PLAN DE CONTROL DE CALIDAD	27
14. PROPUESTA PARA LA LICITACIÓN	28
14.1. Clasificación del contratista	28
14.2. Revisión de precios	28
15. PRESUPUESTO.....	29
16. DOCUMENTOS QUE COMPRENDE EL PROYECTO	29
17. CONCLUSIONES.....	32

1. MARCO DEL PROYECTO

El 'Pla Director d'Infraestructures del transport col·lectiu de la regió metropolitana de Barcelona 2011–2020' (PDI 2011–2020) incluye el proyecto de desdoblamiento de la línea del Vallès de los Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC), como una de las actuaciones a proyectar en el período 2011-2020.

Esta actuación plantea una prolongación por la Ronda de Sant Pere, en dirección al distrito del 22@, desde la actual estación de Plaza Cataluña hacia Horta y el Vallès, a través un nuevo túnel por Collserola, hasta enlazar de nuevo con la red de FGC en Sant Cugat del Vallès.

La prolongación de la línea del Vallès supone una obra de más 18 km nuevos de línea férrea y la creación o ampliación de 8 estaciones. Se prevé que la globalidad del trazado será en túnel. La



Figura 1. Actuaciones de la red de FGC. (FUENTE: PDI 2011-2020)

actuación contemplada permitiría la circulación de 36 trenes por sentido en hora punta que significa un incremento del 29% de la capacidad con respecto a la situación actual.

Por otro lado, existe desde hace décadas el proyecto de construcción del túnel de Horta, entre Barcelona y el Vallès Occidental, que se ha incluido en varios planes directores de Infraestructuras desde el año 1976. Se recupera este túnel como solución a la creciente necesidad de resolver el problema de retenciones acontecidas diariamente en la ciudad de Barcelona.

Barcelona y su área metropolitana se comunican diariamente por miles de trayectos en diferentes modos de transporte de la población desde sus hogares hasta su lugar de trabajo. En concreto, el corredor Barcelona – Vallès Occidental soporta una elevada intensidad de tráfico cada día, lo que se traduce en una disminución drástica de la velocidad media de circulación de las vías de acceso a la ciudad desde las localidades del Vallès occidental.

Dadas las circunstancias, se ha optado por realizar una solución conjunta a los problemas que se presentan tanto en el corredor viario como en el ferroviario. Por ello, se ha llevado a cabo un proyecto básico que consiste en la construcción de un túnel para tráfico mixto (ferrocarril y automóvil) que une Barcelona con el Vallès. En dicho proyecto se considera el tramo entre Horta y Can Cerdà, en la sierra de Collserola y perteneciente al municipio de Cerdanyola del Vallès, entorno en el que tendrá lugar la bifurcación de ambos ejes: hacia Sant Cugat el ferrocarril y dirección Sabadell la autovía.

El actual proyecto es un documento basado en aproximaciones y estimaciones que puede ser un punto de partida para un posible proyecto constructivo.

2. RAZÓN DE SER Y ANTECEDENTES

Como ya se ha dicho, el proyecto consiste en la unión de un proyecto viario y otro ferroviario, por lo que deberán justificarse ambos proyectos diferenciadamente.

2.1. El ferroviario

Por un lado, la red ferroviaria de los FGC Barcelona-Vallés consta actualmente de 8 líneas que se extiende sobre 44,2 km de longitud: cinco ofrecen un servicio suburbano (S1 Terrassa Naciones Unidas, S2 Sabadell Rambla, S5 Sant Cugat, S6 Universidad Autónoma y S7 Rubí) y las otras tres realizan un servicio urbano (L6 Sarrià, y L7 Av.Tibidabo y L12 es un servicio lanzadera entre Sarrià-Reina Elisenda).

La red tiene un ancho internacional (1.435 mm) y la electrificación es de 1.500 Vcc. Todo el sistema ferroviario del Vallés es de doble vía –una vía por sentido.



El servicio ofrecido está limitado por las características de la red ferroviaria, que hoy ya opera

Figura 2 Red FGC Barcelona-Vallés actual. FUENTE: FGC

prácticamente a su máxima capacidad. La línea del Vallés funciona al límite de su capacidad en el tramo entre Gracia y Plaza Cataluña. Este tramo consta de un único túnel de doble vía y en el que confluyen las 8 líneas de la red ferroviaria FGC mencionadas.

En la hora punta de un día laborable, se opera a 32 trenes por sentido y hora, un tren cada 90 segundos. El servicio ofrecido se considera insuficiente para absorber la demanda existente y potencial del Vallés y para ofrecer una calidad adecuada. La limitación a 32 servicios hora/sentido es uno de los factores que impide aumentar la frecuencia de las líneas hacia Sant Cugat, Rubí, UAB, Sabadell y Terrassa.

El cizallamiento es también otro de los puntos críticos que limita la capacidad de la red en el Vallés. En hora punta el cizallamiento (cruce de vías a nivel) en la Estación de Sant Cugat (22 trenes por hora sentido, en hora punta) dificulta el mantenimiento de estabilidad de los horarios y, en caso de incidencia, el impacto negativo sobre la red es amplificado.

Dado el nivel de saturación del túnel Gracia-Pl.Cataluña y Gracia-Sant Cugat, la construcción de un segundo túnel entre Barcelona y el Vallés contemplada en el PDI permitiría resolver la cuestión de capacidad operacional de la red ferroviaria del metro del Vallés.

Por otro lado, la reciente prolongación de la línea Barcelona-Vallés de FGC en Terrassa y Sabadell implica aumentar la capacidad de la actual red ferroviaria del metro del Vallés. Estas dos prolongaciones conllevan un aumento de la demanda, esto refuerza también la pertinencia del proyecto de desdoblamiento.

La prolongación de la línea FGC en Terrassa puesta en servicio en el año 2015 supone 4,5 kilómetros de tramo de línea y tres nuevas estaciones urbanas subterráneas constituyendo una verdadera línea de metro propia que une y comunica la ciudad.

Del mismo modo, la reciente prolongación de la línea FGC en Sabadell, puesta en servicio en Julio de 2017, tiene una longitud de 4,2 kilómetros y tres estaciones más en el municipio.

La ampliación de FGC en la Terrassa ha supuesto en sus primeros seis meses de vida un aumento de 750.000 viajeros. Estos datos sobrepasaron con creces las expectativas iniciales, que eran de una subida del 20-25%.

Con las prolongaciones de la línea Barcelona-Vallés, el aumento de pasajeros es evidente. Esto hace que un desdoblamiento de la línea permitirá un incremento de la capacidad de transporte pasando de los 32 trenes por sentido a 36 trenes por sentido y hora, como mínimo (según el PDI), la que comporta una incremento substancial del 29% de la capacidad con respecto a la situación actual.

Esto significa una mejora notable en la oferta de movilidad en transporte público entre los municipios del Vallés y su entorno y su conexión con Barcelona y el área metropolitana.

El aumento de la capacidad de servicio ofrecido de la línea del Vallés se traduce en una reducción del tiempo de espera en los andenes (menos tiempo de transporte puerta a puerta) y también se traduce en un aumento del confort del trayecto (tanto en la espera en los andenes como dentro del vehículo).

Además, el desdoblamiento de la línea permite dar más permeabilidad a la red aumentando la cobertura territorial y mejorando el mallado de la red. Los usuarios del Vallés dispondrán de más itinerarios posibles para desplazarse a Barcelona. Cabe también destacar que se aumentarán las posibilidades de conexión con el resto de la red de transporte público de la AMB (sobre todo con las líneas de metro). Los usuarios en dirección hacia el Vallés también disfrutarán de un abanico de itinerarios más amplio. Además, la repartición de los flujos de entrada y salida entre Barcelona y el Vallés Occidental derivada del desdoblamiento conllevará una reducción de los pasajeros en transbordo en estaciones como Provenza o Sarrià, que hoy sufren una gran saturación.

Por lo tanto, los actuales usuarios disfrutarán de una oferta de servicio de transporte público más amplia, más fiable y confortable. Gracias a las mejoras del servicio y a la mayor cobertura territorial el metro del Vallés captará nuevos usuarios.

2.2. Eje viario

El corredor de estudio se sitúa entre las poblaciones de Barcelona y la comarca del Vallés occidental, en la provincia de Barcelona, punto en el que se bifurcarán los ejes viarios y ferroviarios hacia Sabadell y Sant Cugat respectivamente. Las principales vías del corredor Barcelona-Vallés Occidental en el ámbito del transporte por carretera actual es la siguiente:

- AP-2: Tramo Barcelona – El Papiol
- C-16: Túnel de Vallvidrera; Barcelona –Sant Cugat
- C-58: Barcelona – Cerdanyola del Vallés

La red básica del corredor se representa de forma gráfica en el esquema siguiente:



Figura 3. Principales ejes viarios del corredor en estudio. FUENTE: Gencat

La IMD de las carretas de la zona metropolitana de Barcelona es muy elevada, llegando hasta 165.000 vehículos durante algunas franjas horarias. La gran cantidad de vehículos que soporta la infraestructura viaria metropolitana de Barcelona provoca que la velocidad de circulación sea muy baja, en algunos casos, inferior a 40 km/h. En la imagen siguiente se observa, en rojo, aquellos tramos en los que la velocidad es inferior a estos 40 km/h, y en amarillo en los que no sobrepasa los 80 km/h.



Figura 4. Mapa de velocidades a las 8:30 de la mañana. FUENTE: RACC, 2007.

Un nuevo eje viario entre Barcelona y Sabadell permitiría liberar parte de la congestión y aumentar así la velocidad media de los trayectos implicados. Este hecho supondría una disminución del tiempo de viaje de los usuarios así como una mejora de la calidad de vida, ya que se reduciría el tiempo en retenciones durante las horas punta.

3. DATOS DEL PROYECTO

NOMBRE DEL PROYECTO: Túnel mixto para ferrocarriles y automóviles entre Horta y el Vallès.

AUTOR DEL PROYECTO: Cristina Aguado Díaz

ESTUDIOS QUE CURSO EL AUTOR: Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

TUTOR DEL PROYECTO: Javier Pablo Ainchil Lavin

POBLACIONES: Barcelona, Cerdanyola del Vallès.

4. OBJETO DEL PROYECTO

El objeto del presente proyecto básico es definir las actuaciones necesarias para realizar un túnel de tráfico mixto, viario y ferroviario, entre Horta y el Vallès occidental. La actuación ferroviaria está planteada en el PDI 2011-2020 como actuaciones a proyectar, el desdoblamiento del actual trazado ferroviario de la línea de FGC del Vallès; la actuación viaria, por su parte, se recupera de un antiguo proyecto previsto en el Plan General Metropolitano (PGM) del año 1976.

Este proyecto se centra únicamente en el tramo de la obra relativo al túnel conjunto de los dos ejes, viario y ferroviario, que se inicia en la zona de Horta en Barcelona, concretamente en el entorno de la estación de Valldaura, en la continuación de l'Avinguda de l'Estatut de Catalunya, y finaliza en el punto en el que se bifurcan ambos ejes en el interior de la sierra de Collserola, en Can Cerdà, municipio de Cerdanyola del Vallès. Este proyecto básico incluye el complejo enlace que se debe realizar en Barcelona entre la Ronda de Dalt y el túnel, contemplando todos los movimientos posibles y el propio túnel, así como también plantea el trazado a su salida y se realizan los primeros metros de la bifurcación de los dos ejes de transporte.

El proyecto consiste, en primer lugar, en un estudio de alternativas de trazado entre la actual estación de metro de Valldaura y el punto de finalización del túnel mixto. Se estudian también las alternativas de los métodos constructivos de los ejes, así como la decisión de aspectos constructivos del propio túnel, que se verán en los anejos a esta memoria correspondientes.

El eje se inicia en el entorno de estación de Valldaura, en el distrito de Horta-Guinardó. Se opta por esta ubicación porque favorece tanto al eje viario como al ferroviario:

- Eje viario: se opta por un transcurso natural del túnel de la Rovira hacia el Vallès Occidental, atravesando la sierra de Collserola.
- Eje ferroviario: se une la L3 de metro con la nueva línea de FGC. En el PDI se contempla el desdoblamiento a partir de la última parada en Barcelona, ubicada por el entorno de la estación de Mundet. Para este proyecto básico se considera que el eje ferroviario está construido hasta la boca de acceso al túnel en Barcelona, formando parte ésta del trazado ferroviario de otro proyecto.

Así pues, con el objetivo de unir los dos ejes, se opta por iniciar el recorrido del túnel en la Avinguda de l'Estatut de Catalunya, en Horta, y seguir se transcurso por el interior de Collserola hasta el Vallès Occidental.

A pesar de que no es objeto explícito de este proyecto, se plantea que los puntos finales de los ejes viario y ferroviario serán:

- Eje viario: C-58 a la altura de Sabadell Sur. Se deberá realizar en otros proyectos un análisis más exhaustivo para ver a que altura debería ser el enlace. Se estima que el final del eje viario pertenecerá al municipio de Sabadell.
- Eje ferroviario: estación actual de FGC de Sant Cugat. Es un punto estratégico en la línea puesto que es donde se produce la bifurcación de las líneas sub-urbanas S1, S2, S5, S6 y S7.

Por lo tanto, la obra definida en el presente proyecto se concreta en la construcción de dos vías de ferrocarril paralelas en la parte inferior del túnel; y una autovía de tres carriles en la parte superior, soportada por una plataforma que divide la sección transversal del túnel diametralmente de manera horizontal.

Se busca minimizar el impacto ambiental dado que la mayor parte del trazado, aunque subterráneo, transcurre en un espacio natural de protección especial. Se analizan las diversas alternativas de trazado bajo el punto de vista económico.

Como ya se ha mencionado, el propósito del túnel desde el punto de vista ferroviario es el de resolver la saturación del túnel entre Plaza Cataluña-Sarria y, en consecuencia, también la saturación entre Plaza Cataluña y Sant Cugat. Gracias a la construcción de una nueva conexión entre Barcelona y Sant Cugat se podrá aumentar el servicio de transporte público en el Área Metropolitana de Barcelona y absorber la demanda potencial de usuarios a la vez que se ofrecerá una calidad de servicio mayor a los usuarios actuales.

Por otro lado, el túnel también se proyecta con el objetivo de aligerar el tráfico rodado en las principales vías de acceso a la ciudad desde el lado Besós, aliviando la congestión en el Nudo de la Trinidad, Rondas y C-58. El nuevo túnel viario permitirá reducir el tiempo de espera de los usuarios durante las retenciones diarias de la mañana y la tarde. De este modo, se mejora la conectividad entre Barcelona y los municipios de su área metropolitana situados más al Norte, pertenecientes a la comarca del Vallés Occidental.

Las zonas beneficiadas de este proyecto se extienden más allá de éstos dos municipios de inicio y final de la obra. Desde el punto de vista ferroviario, los habitantes de Rubí, Terrassa, Sabadell y las zonas urbanas del entorno también se beneficiarán del aumento de oferta de servicio de transporte público. Desde el punto de vista viario, la obra beneficiará a los municipios de Cerdanyola del Vallés, Badia del Vallés y Sabadell, así como otras zonas urbanas cercanas.

El presente proyecto no contempla las obras de ampliación de la Estación de Estación de Valldaura, ni tampoco el tramo ferroviario entre la salida del túnel y Sant Cugat ni el tramo viario entre la salida y su conexión con la carretera C-58 en el entorno de Sabadell. Estas obras deberán ser objeto de otro/s proyecto/s.

5. CONDICIONANTES GENERALES

5.1. Marco geográfico

Este proyecto se enmarca en el Área Metropolitana de Barcelona (AMB). Ésta se extiende sobre una superficie de 636 km² y engloba 36 municipios. En la AMB viven más de 3 millones de personas. El 48% de su superficie está urbanizada y el resto de su territorio está ocupado por 25 km de playas y más de 25.000 hectáreas de zonas naturales.

El tramo mixto del presente proyecto transcurre desde la zona alta de la ciudad de Barcelona hasta Can Cerdà, punto se produce la bifurcación de los dos ejes, perteneciente al municipio de Cerdanyola del Vallés, en la comarca del Vallés Occidental.

La ciudad de Barcelona concentra más de 1,6 millones de personas. Sant Cugat cuenta con más de 89.000 habitantes y Sabadell ronda los 208.300 (Instituto de Estadística de Cataluña, 2016).

La Cordillera Litoral catalana constituye una frontera entre el oeste de Barcelona y el Vallés Occidental.

La Sierra de Collserola tiene unas dimensiones aproximadas de 11.100 hectáreas de superficie, con una longitud de 17 km y 6 km de anchura. La Sierra de Collserola se integra en el sector central de la Cordillera del Litoral Catalana que, paralela a la costa, se extiende desde el Cap de Begur (en el Empordà) hasta el sur de Vilanova y la Geltrú. Los límites del macizo de Collserola son muy precisos: al este limita con el río Besòs; al oeste, con el río Llobregat; las rieras de Sant Cugat y de Rubí son el límite por el lado norte; y el llano de Barcelona, por el sur.

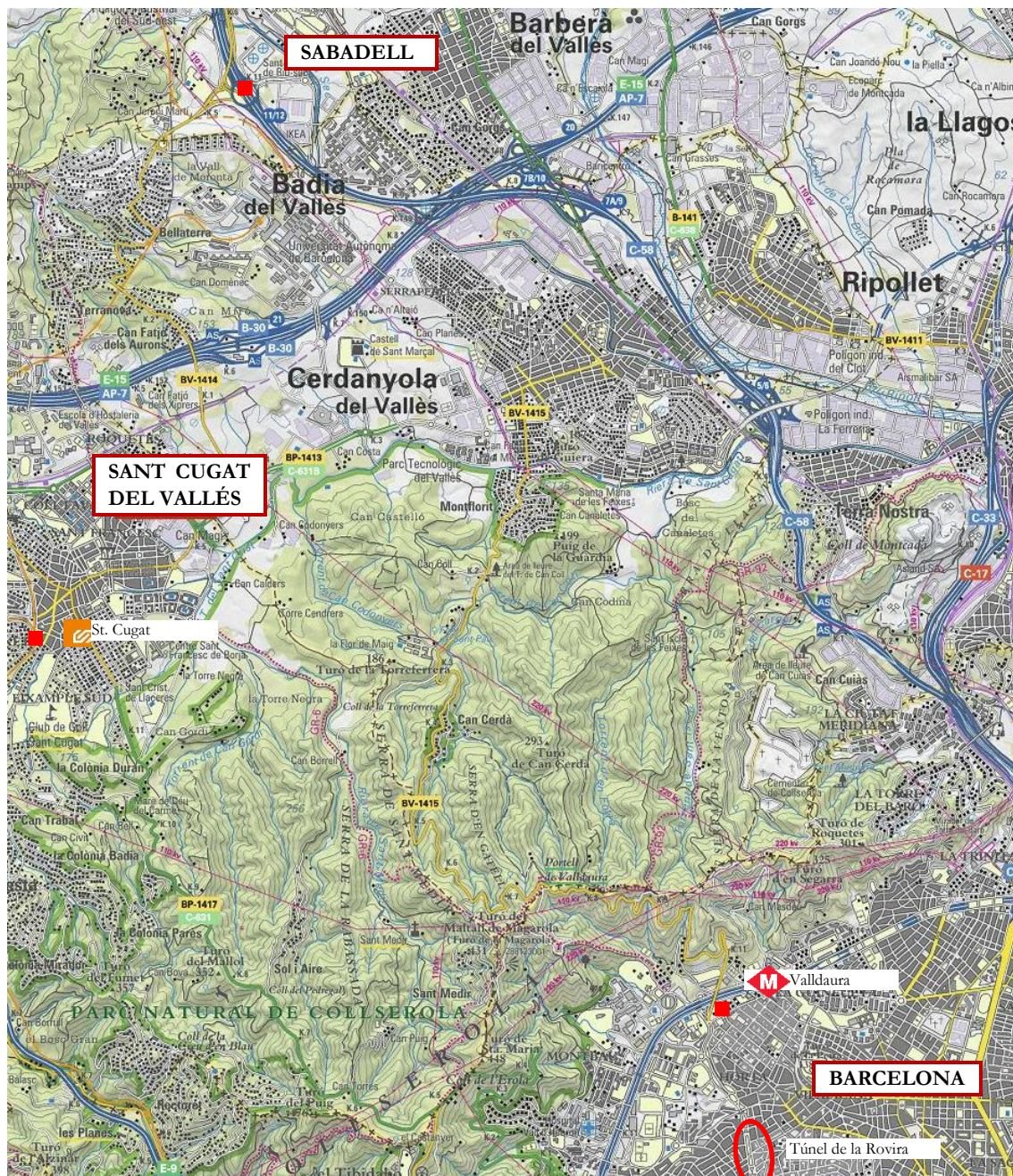


Figura 5. Marco geográfico. FUENTE: Elaboración propia a partir del ICGC.

5.2. Topografía

Al tratarse de un proyecto académico, no se ha podido llevar a cabo un levantamiento topográfico de todo el trazado, sino que se han obtenido los datos del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC):

Se ha utilizado la escala 1:5.000, que es la escala más precisa de la cual se dispone de todos los formatos necesarios para su posterior descarga y tratamiento.

El trazado del presente proyecto se inicia en la continuación de la Avinguda de l'Estatut de Catalunya, entre el Velódromo de Horta y las Cocheras de Horta, donde el terreno natural se encuentra a una cota de 140 m sobre el nivel del mar. El punto de salida tiene lugar en Can Cerdà, en Collserola, donde la cota natural del terreno es de 168 m.

El trazado atraviesa la Cordillera de Collserola. El macizo de Collserola presenta un relieve suave, pero bastante asimétrico. Mientras que las crestas del lado del Vallés son largas y con un descenso suave, las vertientes orientadas al mar (hacia el municipio de Barcelona) son cortas y con una pendiente pronunciada; como se observa claramente en el perfil altimétrico NO-SE. Esta particularidad es un factor a tener en cuenta en la elección de método de ejecución del túnel.

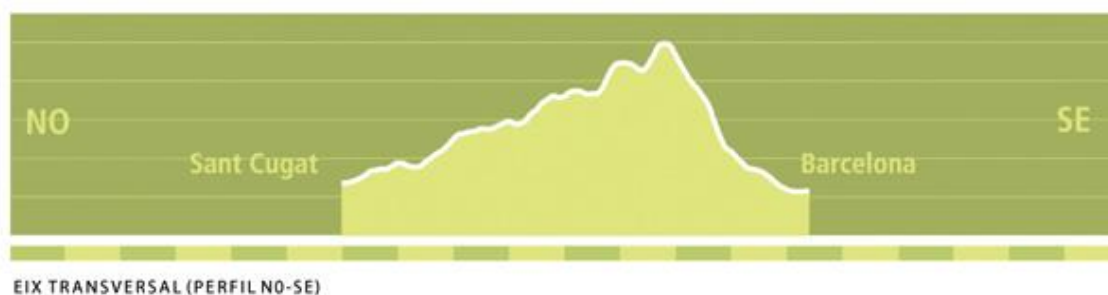


Figura 6. Perfil altimétrico NO-SE de la Sierra de Collserola: Eje transversal. FUENTE: Parque Natural de Collserola.

El punto más elevado de la sierra de Collserola es el cerro del Tibidabo (512 metros). Este está situado al sur del trazado del presente proyecto.

5.3. Geología y geotecnia

Al ser un proyecto académico no se han podido realizar sondeos requeridos y tampoco se dispone de los correspondientes estudios geotécnicos que describen el comportamiento resistente del terreno y, por lo tanto, no se pueden definir ni los parámetros geológicos ni los geotécnicos.

A grandes rasgos se pueden distinguir dos principales tipos de terreno en la zona donde se emplaza el proyecto. Los dos tipos pertenecen a la unidad de la Cordillera Litoral catalana. El primer tipo de terreno corresponde al suelo presente en las dos caras de la cordillera, en el que se incluye el núcleo urbano de Barcelona. Este tipo de terreno es el que se encuentra presente en las inmediaciones de la estación de Valldaura. Está formado por depósitos de piedemonte. Estos depósitos consisten en derrubios angulosos de pizarras y cuarcitas mezcladas con arcillas de rojas.

El segundo tipo de suelo corresponde al suelo del corazón del macizo de Collserola. Éste está constituido por pizarras y filitas paleozoicas (Era Primaria). A raíz de la intrusión de magma, se formaron los granitoides, rocas ígneas plutónicas constituidas esencialmente por cuarzo, feldespato y mica. Debe destacarse que la descomposición de estas rocas origina el sauló.

Por último, aunque no forma parte de manera explícita de este proyecto, el tercer tipo de suelo que afecta al trazado general de la obra una vez se ha efectuado la salida del túnel, está constituido por abanicos y llanuras aluviales, en los que se ubican los núcleos urbanos de Sant Cugat y Sabadell.

En el *anexo 3 - Geología* se estudia en detalle la geología y geotecnia a partir de los datos del ICGC.

5.4. Climatología

La presencia de la cordillera de Collserola y la proximidad al mar influyen en el clima de las dos comarcas en las que transcurre el proyecto.

El clima del Barcelonés es mediterráneo tipo Litoral Central, mientras que el clima del Vallés Occidental es mediterráneo tipo Prelitoral Central. La precipitación media anual para ambas comarcas se sitúa alrededor de los 600 mm. Los máximos suelen darse en el otoño y los mínimos en el verano.

Térmicamente, en el lado este de la Cordillera los inviernos son ligeramente suaves, con temperaturas medias de 9°C a 11°C, mientras que en el lado oeste los inviernos son más fríos con temperaturas medias entre 6°C y 8°C.

A ambos lados de la Cordillera, los veranos son secos y calurosos, entre 22°C y 24°C de media. Esto supone una amplitud térmica anual moderada.

Se debe hacer mención a la existencia de variaciones climáticas locales importantes en el macizo de Collserola, los llamados microclimas, que están relacionadas con la topografía del terreno, el efecto termorregulador del mar, el recubrimiento vegetal, etc. Por ello, pueden darse diferencias de más de 10°C entre un lugar y otro.

5.5. Hidrología y drenaje

La zona en la que sitúa el túnel mixto que une Barcelona con el Vallés Occidental pertenece a la cuenca hidrográfica del Besós.

El cálculo de los caudales máximos se basa en los métodos hidrometeorológicos recogidos en la Instrucción 5.2.I.C. Drenaje Superficial. Esta instrucción establece que los caudales se calculan en función del período de retorno de las precipitaciones y dependen del tamaño y la naturaleza de las cuencas aportantes.

En el *anexo 5.Hidrología y drenaje* se calculan los caudales de referencia para diversos períodos de retorno. A partir del mayor caudal de referencia para el periodo de retorno de 100 años, se dimensiona la sección del drenaje longitudinal. Éste consiste en cunetas laterales con desagües en régimen libre. El drenaje transversal se dimensiona a partir del caudal para un periodo de retorno también de 100 años.

5.6. Entorno ambiental

El trazado de este proyecto lineal transcurre en casi su totalidad por el Parque Natural de la Sierra de Collserola, espacio natural de protección especial. Este Parque se incluye en el Plan de Espacios de Interés Natural (PEIN), en la Red Natura 2000 y en el Plan Especial de Protección del Medio Natural y del Paisaje (PEPNat).

En 1987, más de 8.000 hectáreas de la Cordillera de Collserola se incluyeron en el Plan especial de protección y en octubre de 2010 este territorio se declaró Parque Natural. Esta declaración supuso reforzar el objetivo de conservación frente a la protección meramente urbanística. Además, la declaración de parque natural otorga al órgano de gestión del Parque Natural la posibilidad de emitir un informe preceptivo previo al otorgamiento de autorizaciones necesarias para la ejecución de cualquier plan, obra, movimiento de tierras o explotaciones naturales, en el interior o exterior del espacio protegido y que puedan afectarle.

En lo que se refiere al PEPNat, este plan establece que la construcción de nuevas infraestructuras de transportes en espacio natural de protección especial requiere que su trazado se justifique consecuentemente y que se cumplan una serie de criterios y condiciones de realización de las obras.

Para la elaboración del futuro proyecto constructivo del presente proyecto se deberá pedir el informe preceptivo y se deberán cumplir los criterios y condiciones recogidos en el PEPNat.

6. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

6.1. Descripción del trazado

En primer lugar, antes de describir las diferentes alternativas que se presentan para el trazado del túnel, se identifica el corredor por el que éste debe transcurrir.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el proyecto completo se divide en tres tramos:

- a. TRAMO 1: Enlace en Barcelona entre las vías existentes en la ciudad y el nuevo eje viario que se describe en este proyecto.
- b. TRAMO 2: Túnel entre la zona de Horta, en Barcelona, y el corazón de la Sierra de Collserola.
- c. TRAMO 3: Salida del túnel a superficie y bifurcación de los ramales viario y ferroviarios. El ramal ferroviario toma dirección hacia Sant Cugat del Vallés, enlazando con el actual trazado de la línea Barcelona-Vallés de FGC. El ramal toma dirección hacia Sabadell, con el objetivo de enlazar con la carretera C-58.

Este proyecto abarca los dos primeros puntos: el enlace en Barcelona y el túnel. Además, plantea una solución para la bifurcación y describe los 200 primeros metros de cada ramal después de la bifurcación. No obstante, el recorrido de los ramales hasta sus respectivos destinos será objeto de estudio en futuros proyectos.

Las alternativas de trazado se estudian sobre los tramos a y b del proyecto, que son el enlace y el túnel entre Barcelona y la Sierra de Collserola objeto de este trabajo.

6.2. Estudio de alternativas de trazado

A la hora de plantear las alternativas, se parte de la base que la prolongación de la línea de FGC del Vallés a proyectar durante el período 2011-2020 planteado en el PDI 2011-2020, se ha llevado a cabo y será ejecutado hasta la cara sur de la sierra de Collserola, coincidiendo con la boca sur del túnel objeto de este proyecto. Este proyecto desdobra la línea ferroviaria hasta el Vallès por debajo de la sierra de Collserola a la vez que crea un nuevo túnel viario desde Horta hasta Sabadell, mejorando la movilidad viaria entre Barcelona y el Vallés y descongestionando la línea ferroviaria, con limitaciones de capacidad actualmente.

El estudio de alternativas se realiza teniendo como objetivo la construcción del túnel mixto ya citado, intentando maximizar la mejora en movilidad y disminuyendo el impacto ambiental que una obra de este calibre tiene en un espacio natural protegido como es la Sierra de Collserola. Por ello, se ha llevado a cabo el estudio de alternativas teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Limitar la expropiación temporal o definitiva de terrenos
- Minimizar el impacto medioambiental y urbano
- Reducir el tiempo de viaje tanto en ferrocarril como en automóvil desde Barcelona hasta Sant Cugat y Sabadell respectivamente.
- Optimizar el coste económico del proyecto

En este proyecto se necesita un espacio considerable para que la tuneladora entre bajo la montaña y salga después del recorrido del túnel. Por ello, los posibles trazados son limitados.

Por otro lado, la construcción del túnel empieza con el presente proyecto, por lo que no se tienen referencias de inicio y final del trazado.

Teniendo todo esto en mente, se considera que la boca sur del túnel en Barcelona puede ubicarse en dos zonas en el entorno de Horta, en las estaciones de Mundet o de Valldaura. Asimismo, la boca norte, en Collserola, también puede ubicarse en dos zonas de la sierra en las que ya existe una cierta modificación del terreno existente, evitando de este modo un impacto ambiental mayor.

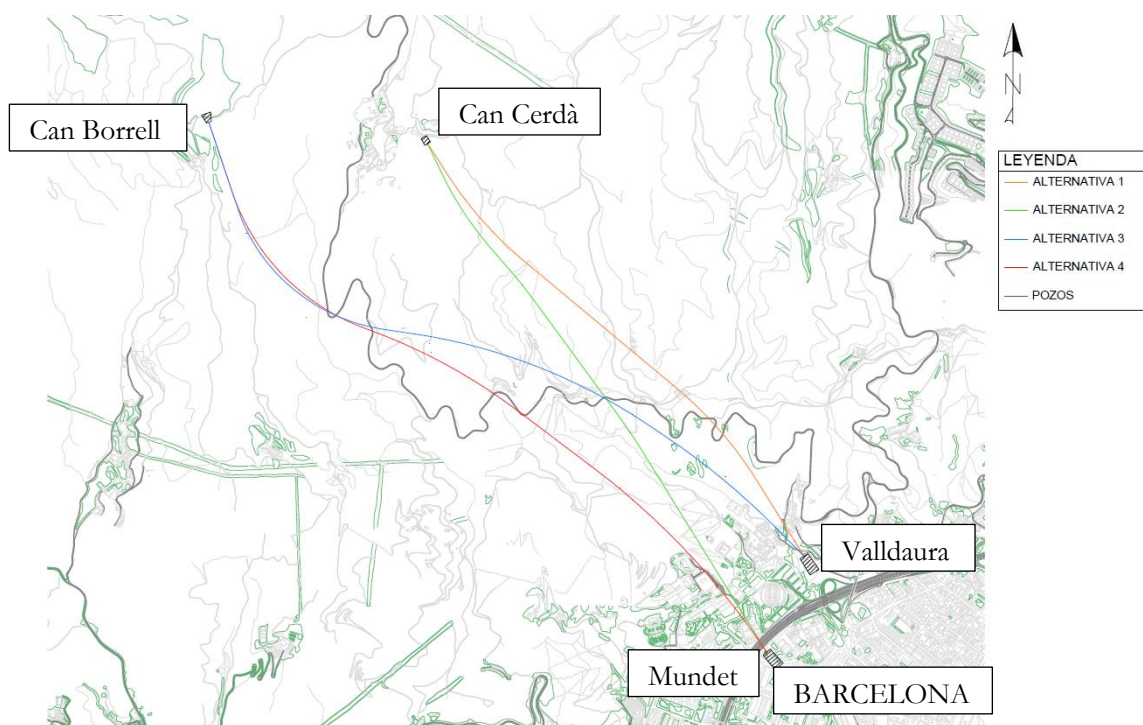


Figura 7. Alternativas de trazado. FUENTE: Elaboración propia.

Así pues, combinando estas opciones, se plantean las siguientes alternativas de trazado.

- ALTERNATIVA 1: Salida del túnel desde Barcelona en las inmediaciones de la estación de Valldaura hasta salir al este de la carretera BV-1415 en la Serra d'en Gatell, zona de Can Cerdà.
- ALTERNATIVA 2: Salida del túnel desde Barcelona en la inmediaciones de la estación de Mundet, siguiendo su recorrido por debajo de la sierra de Collserola hasta salir al este de la carretera BV-1415 en la Serra d'en Gatell, zona de Can Cerdà.
- ALTERNATIVA 3: Salida del túnel desde Barcelona en las inmediaciones de la estación de Valldaura hasta salir al oeste de la carretera BV-1415 en el inicio de la Serra de la Rabassada, zona de Can Borrell.
- ALTERNATIVA 4: Salida del túnel desde Barcelona en las inmediaciones de la estación de Mundet hasta salir al oeste de la carretera BV-1415 en el inicio de la Serra de la Rabassada, zona de Can Borrell.

Puesto que el método constructivo de todas las alternativas es el mismo, las alternativas de trazado son similares. Difieren principalmente en la longitud del mismo y en la cantidad de movimientos de enlace que se pueden realizar debido a la ubicación de las bocas del túnel. En el anejo 6 – Estudio de alternativas se lleva a cabo un estudio exhaustivo de cual resulta la mejor alternativa para el trazado del presente Proyecto.

Para llevar a cabo una evaluación sostenible es necesario analizar las vertientes económicas, sociales y medioambientales de una alternativa. Debido a que el presente proyecto tiene como objetivo mejorar la movilidad entre dos nodos de generación de demanda importante como son Barcelona y Sant Cugat para el caso del ferrocarril y Barcelona y Sabadell/Cerdanyola para el caso viario, es coherente que la vertiente social tenga un mayor peso en la toma de decisiones.

Así pues, se ha decidido dividir el criterio social en dos partes, el puramente social y aquel relacionado con la movilidad, puesto que este proyecto tiene como objetivo último mejorar la movilidad tanto viaria como ferroviaria entre dos núcleos de población.

De este modo, se han definido las alternativas según cuatro requerimientos, cada uno con un peso asociado, según se puede ver a continuación:

- Económico (25%)
- Social (20%)
- Sobre la movilidad (35%)
- Ambiental (20%)

En la tabla presentada a continuación se resumen los criterios utilizados y sus respectivos indicadores, así como los resultados obtenidos en el análisis multicriterio de elección del trazado.

		PESO		NOTA				NOTA PONDERADA			
				A.1	A.2	A. 3	A. 4	A. 1	A.2	A. 3	A.4
ECONÓMICO	Coste del trazado	25%	70%	8	7	5	4	1,4	1,225	0,875	0,7
	Coste de las expropiaciones		30%	6	8	6	8	0,45	0,6	0,45	0,6
SOCIAL	Afectación a los habitantes durante las obras	20%	100%	10	2	10	2	2	0,4	2	0,4
MOVILIDAD	Tiempo de viaje en ferrocarril	35%	20%	8	7	8	7	0,56	0,49	0,56	0,49
	Tiempo de viaje en vehículo privado		20%	9	9	8	8	0,63	0,63	0,56	0,56
	Número de vías afectadas		20%	8	6	8	6	0,56	0,42	0,56	0,42
	Número de vías afectadas durante las obras		10%	7	8	7	8	0,245	0,28	0,245	0,28
	Número de movimientos directos permitidos en el enlace		30%	10	2	10	2	1,05	0,21	1,05	0,21
AMBIENTAL	Contaminación acústica	20%	30%	8	2	8	2	0,48	0,12	0,48	0,12
	Impacto sobre los espacios de protección especial		70%	6	5,5	4,5	4	0,84	0,77	0,63	0,56
								8,215	5,145	7,41	4,34

7. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

7.1. Descripción general

A raíz del estudio de alternativas, se obtiene que la Alternativa 1 es la óptima. Se procede a definir con más precisión el trazado de dicha alternativa (en perfil y en alzado) a la vez que se incorporan elementos de mejora.

El trazado del túnel mixto para ferrocarriles y automóviles tendrá su inicio en Horta y su salida en Can Cerdà, en la sierra de Collserola.

En el presente capítulo se definen los elementos que configuran la solución adoptada, desde el trazado, en planta y perfil, así como aspectos constructivos del túnel.

7.2. Trazado

El proyecto consiste en una vía ferroviaria doble y una autovía de tres carriles de 3,1 metros de ancho, dos de ellos con un sentido de circulación fijo y el carril central de sentido reversible en función de la demanda en cada momento.

En el cálculo de la geometría del trazado en planta y en alzado intervienen una serie de parámetros para los cuales se adoptan, según la naturaleza del mismo, unos valores máximos o mínimos en función de la velocidad y de las características funcionales de la línea.

La velocidad de diseño para la nueva línea de FGC es de 90 km/h.

La velocidad de diseño el nuevo eje viario es de 120 km/h en el tramo del túnel. El tramo del enlace en la zona urbana de Barcelona hasta el pozo de ataque, sin embargo, se ha diseñado para una velocidad mínima de 50 km/h.

En el *Anejo 7-Trazado* se definen los parámetros y valores asociados que sirven como base para el cálculo de la geometría del túnel mixto para tráfico viario y ferroviario entre Valldaura y el Vallés occidental.

El trazado lineal del túnel se diseña, en planta, con tramos rectos y circulares, con radios 3.000 y con curvas de transición. Como curvas de transición se adoptan las de tipo clotoide con longitudes amplias que no penalicen la comodidad de los usuarios.

En el enlace, los radios son menores debido a las características geométricas que vienen exigidas por el espacio disponible.

En la bifurcación a la salida del túnel existe curvas importantes ya que los ramales viario y ferroviario se dirigen en sentidos opuestos, no obstante, los radios mínimos rondan los 700m.

En alzado, la pendiente vertical máxima del túnel es de 0,89%, mientras que las mayores endientes a las que están sometidos el tren y los automóviles son, respectivamente, 0,89% y 1,41%.

Las principales características del trazado tanto para el eje viario como para el ferroviario se encuentran detalladas en el *anejo 8 – Trazado*.

7.3. Túnel

El túnel se inicia junto al velódromo de Horta, se introduce en la sierra de Collserola, y sale en Can Cerdà, por la otra vertiente de la cordillera en el municipio de Cerdanyola.

El método de construcción del túnel es mediante tuneladora de doble escudo. Dichas tuneladoras son de tipo mixto, consistente en una combinación de topes y escudos. Se trata de un escudo telescópico articulado en dos piezas pensado para sostener el terreno al avanzar en la excavación del túnel. Se trata de una máquina muy versátil, pues permite excavar tanto la roca dura que los escudos propiamente dichos no podrían perforar, pero además, permite la excavación en terrenos inestables

y heterogéneos que los topos no podrían realizar. Por tanto, es la mejor solución para macizos con tramos de tipología variable suelo-roca.

Las características que adoptarás la sección transversal de túnel del presente Proyecto son las siguientes:

- Diámetro de excavación: 15,01 m
- Diámetro exterior del túnel: 14,65m
- Diámetro interior del túnel: 13,45m
- Sección excavación: 176,95 m²
- Revestimiento de dovelas de hormigón armado prefabricadas: 0,60m
- Sección libre para el eje viario: 64,9 m²
- Sección libre para el eje ferroviario: 63,2 m²

7.3.1. Características del eje viario

El eje viario se compone de tres carriles de 3,1 m de ancho. Se destinará un carril para cada sentido (Vallés-Barcelona) mientras que el carril central será de uso reversible dependiendo de las demandas del tráfico. Debido a la limitación de espacio de la excavación con tuneladora, no hay existencia de arcones. Sin embargo, sí que hay dos aceras, una a cada lado, de un ancho útil de 1,5 m, previstas para la evacuación de personas del túnel en caso de emergencia.

La capa de rodadura se dispone sobre la losa intermedia que separa el eje viario del ferroviario, de 55 cm de espesor. Esta capa está conformada por mezcla bituminosa en caliente de 8 cm de espesor.

Como se ha mencionado con anterioridad, el gálibo para los vehículos es de 4,5 m, que es el gálibo mínimo para los túneles en España, correspondiendo a la altura máxima de los vehículos según el Ministerio de Fomento.

7.3.2. Características del eje ferroviario

El eje ferroviario se compone por una vía doble de ancho internacional, de entrevería 3,7 m. Dispone de dos pasarelas de evacuación de personas, una a cada lado, a utilizar en caso de emergencia. El gálibo cinemático es de 4,35 m, cumpliendo el gálibo establecido por la UIC de 4,310 m para vías de ancho internacional, mencionado con anterioridad.

A continuación se muestra una sección tipo del túnel.

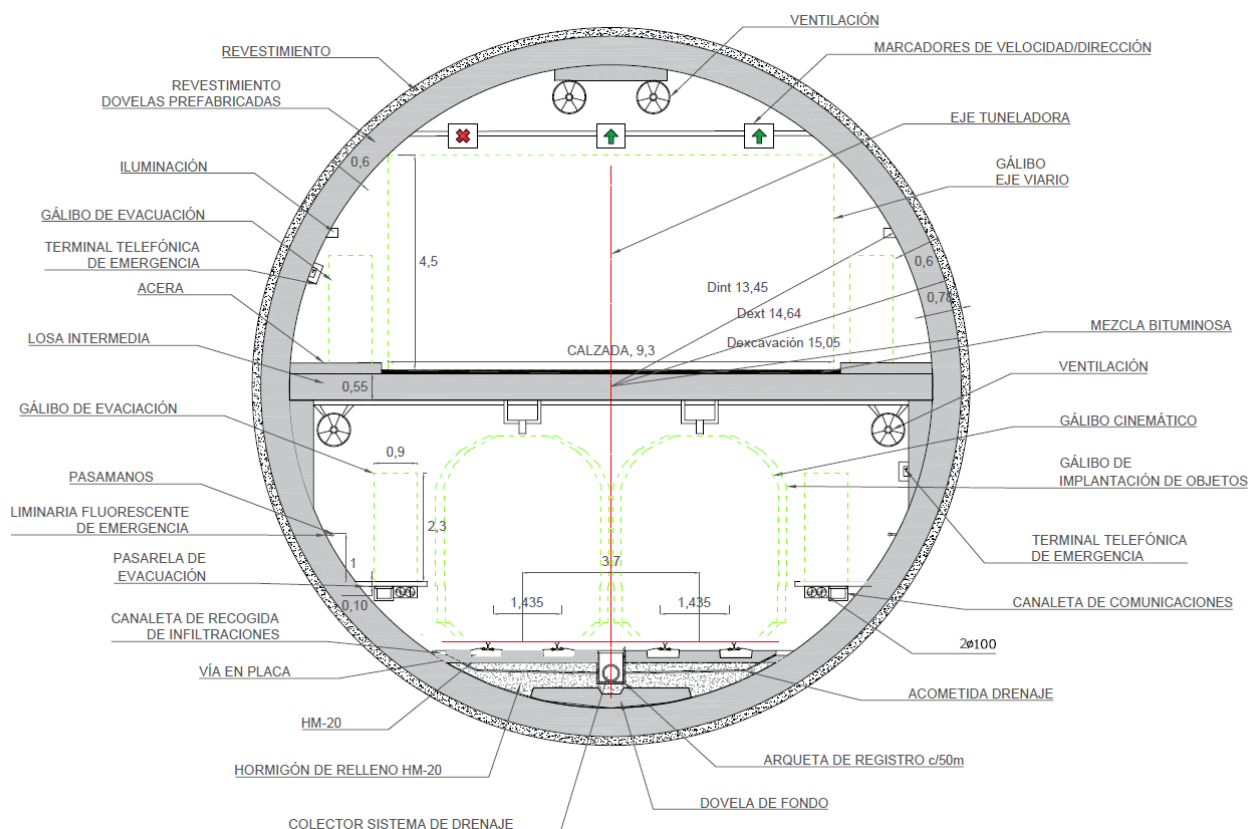


Figura 8. Sección tipo túnel. FUENTE: elaboración propia.

En el *anexo 9 – Túnel* también se pretende realizar una primera aproximación del cálculo del túnel mediante elementos finitos. Posteriormente se utilizan los resultados obtenidos para tomar una decisión respecto al método de ejecución de la losa intermedia del túnel, la encargada de soportar el tráfico rodado.

Por otro lado, se describe la plataforma de rodadura de los vehículos y se incluye una descripción de los sistemas de seguridad presentes en el túnel.

7.4. Estructuras

Las estructuras presentes en el Proyecto son diversas. En el presente capítulo recogen los detalles del dimensionamiento de los diferentes muros de contención de tierras presentes en el enlace del lado de Barcelona, así como se hará un repaso del procedimiento constructivo de los pozos de ataque de la tuneladora. Por otro lado, se recogen las principales características de los dos viaductos presentes en el proyecto.

7.4.1. Muros de contención de tierras

En el lado derecho, según la dirección de avance, del ramal R1 del enlace en el entorno del pozo de ataque en la ciudad de Barcelona, encontramos un muro de contención de tierra que acompaña el trazado de dicho ramal en casi toda su extensión. Este muro de contención empieza con una altura de 3 m que escalonadamente va aumentando hasta alcanzar los 10 m en el inicio del pozo de ataque de la tuneladora en la boca sur del túnel.

Se ha llevado a cabo el dimensionamiento del muro tal que cumpla los coeficientes de seguridad al deslizamiento y al vuelco. También se han realizado los cálculos de las dimensiones del muro. Los resultados obtenidos son los siguientes:

ID. MURO	Muro S1	Muro S2	Muro S3	Muro S4	Muro S5	Muro S6	Muro S7	Muro S8
P.K. Inicio	0+080	0+170	0+180	0+190	0+200	0+210	0+220	0+230
P.K. Final	0+170	0+180	0+190	0+200	0+210	0+220	0+230	0+260
Altura sobre terreno [m]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
FS Deslizamiento [$>1,8$]	2,2	1,9	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8
FS Vuelco [$>2,0$]	2,0	2,1	2,1	3,3	3,2	2,4	2,8	2,7

Figura 9. Dimensionamiento del muro y factores de seguridad.

En el anejo 10 – Estructuras se muestra con más detalle los cálculos realizados.

7.4.2. Pozos de ataque de la tuneladora

En el anejo de Estructuras también se procede a hacer un análisis de las características y los procedimientos constructivos de los pozos de ataque de la tuneladora. No se ha efectuado ningún cálculo debido a la falta de información y conocimiento sobre el tema específico, pero sí que se ha realizado un análisis exhaustivo sobre las fases de construcción de los mismos.

La posición de las bocas del túnel se establecerá en el lugar dónde se disponga de una superficie suficientemente extensa para localizar las instalaciones exteriores. De manera general, las instalaciones del pozo de entrada deben ser considerablemente mayores a las de salida, puesto que se debe situar el parque de acopio de dovelas y otras instalaciones necesarias para llevar a cabo los trabajos de la obra de manera correcta.

7.4.3. Viaductos

En el transcurso de la obra se encuentran dos viaductos, una en el ramal R2 y otro en la autovía a la salida del túnel en la bifurcación hacia Sabadell. En este capítulo se resumen de manera esquemática las dimensiones básicas de cada uno de ellos, aunque no se han llevado a cabo cálculos exhaustivos puesto que el cálculo de un viaducto ya constituiría un proyecto en sí mismo y ello se escapa de los límites del presente proyecto académico.

– Viaducto del ramal R2

El viaducto del ramal R2 se ubica en el entorno del enlace, en Horta, Barcelona. Se propone como solución al movimiento del enlace entre la Ronda de Dalt sentido Llobregat y la ciudad de Barcelona, en dirección al túnel de la Rovira. Es necesaria la elevación del ramal puesto que por debajo pasará la autovía que proviene del túnel y que enlace el Vallés con Barcelona.

Las cimentaciones son encepados con pilotes, que se utilizan debido a la baja calidad del terreno de la zona, que tal como se explica en el anejo 3 – Geología, son depósitos de piedemonte. Se utilizan pilares de 1 m de diámetro. Tanto las cimentaciones como los pilares son hormigonados “in situ”.

Para la construcción del tablero se utilizan vigas artesa prefabricadas debido a la facilidad de colocado que presentan y su rápida ejecución. Las dimensiones del tablero son:

- Canto de la viga artesa: 1,3 m
- Luz: 25m
- Espesor del tablero: 0,25 m
- Ancho del tablero : 6,5 m
- Pilares por sección: 1
- Altura pilares sobre el cruce con autovía: 5,17 m
- Ancho estribos: 1m
- Profundidad encepados: 1,5 m desde sota del terreno
- Ancho encepados: 4m
- Espesor encepado: 1m
- Profundidad pilotes: 2m

- **Viaducto de la carretera en su bifurcación**

El viaducto de la autovía en su salida del túnel y en la bifurcación hacia Sabadell se ubica en el entorno de Can Cerdà, en la sierra de Collserola perteneciente al municipio de Cerdanyola del Vallès. Se propone como solución a la bifurcación de los dos ramales puesto que el viario debe forzosamente pasar por encima del ferroviario.

El viaducto tiene una longitud de 68,5 m, y consta únicamente de un estribo en su final (desde la salida). El lugar que debería ocupar el primer estribo lo conforma la solución en pérgola utilizada en la salida del túnel.

Igual que en el caso del ramal 2, para la construcción del tablero se utilizan vigas artesas prefabricadas debido a la facilidad de colocación que presentan y su rápida ejecución. Las principales dimensiones del viaducto son:

- Canto de la viga artesana: 1,65 m
- Luz: 25m
- Espesor del tablero: 0,4 m
- Ancho del tablero : 20 m
- Pilares por sección: 3
- Altura máxima pilares sobre el terreno: 5 m
- Ancho estribos: 1m
- Profundidad zapatas: 1,5 m desde sota del terreno
- Ancho encepados: 5m
- Espesor encepado: 1m

7.4.4. Solución en pérgola – bifurcación

En la salida del túnel se produce el cruce de los dos ejes, a alturas distintas, ya que cada uno se dirige a un destino en direcciones opuestas: Sant Cugat es el destino del eje ferroviario y Sabadell el del eje viario.

Para dar solución a este trazado se propone una solución tipo pérgola en la que el eje viario circulara por encima del ferroviario, quedando éste por debajo y entre pilares que sostendrán la estructura.

7.5. Tráfico

El objeto del presente estudio es la definición de los parámetros que desde el punto de vista de tráfico ha de considerar el presente proyecto. En primer lugar se determina la captación de tráfico que se produce en el proyecto. Posteriormente se realiza la prognosis del mismo para obtener la IMD en el año de puesta en servicio, que se ha estimado en el 2019; así como la categoría de pesados en ese mismo año. Asimismo se proyectarán las IMD a lo largo de los 20 años de vida útil del proyecto, siendo el año horizonte el 2039.

Finalmente, se procede a calcular el nivel de servicio del nuevo eje viario tanto para el escenario actual como para el año horizonte.

Una vez llevado a cabo todo el estudio, se obtienen los siguientes resultados:

		TASA DE CRECIMIENTO		
		1,50%	1%	0,50%
Velocidad libre (km/h)		115,1	115,1	115,1
Intensidad equivalente en V_p (vl/d)	Año puesta en servicio	778	770	762
	Año horizonte	1.047	940	842
Velocidad media (km/h)	Año puesta en servicio	104,5	104,7	104,7
	Año horizonte	101,1	103,7	103,7
% tiempo en cola (%)	Año puesta en servicio	49,5	49,2	48,8
	Año horizonte	60,2	56,2	52,3
NIVEL DE SERVICIO	Año puesta en servicio	B	B	B
	Año horizonte	C	C	C

7.6. Firmes y pavimento

Para el dimensionamiento del firme, el condicionante más importante será el tráfico necesario a soportar por la nueva carretera, junto con el clima de la zona. El cálculo de las secciones estructurales de firme así como del cimiento y las capas de núcleo de terraplén, se realiza, siguiendo las instrucciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares presente Proyecto de Construcción, basándose en la Instrucción 6.1.-I.C.

Los factores de diseño son la climatología de la zona y el tráfico. Partiendo de los datos del Estudio de Tráfico realizado en el *Anejo 7 - Tráfico*, se ha calculado la intensidad media de vehículos pesados (IMDp) para el nuevo trazado.

En anejo de Tráfico se ha definido la sección tipo del firme tanto para el interior del túnel como para los tramos que discurren a cielo abierto, calculándose los espesores pertinentes así como los sobrecanchos necesarios.

Por un lado, en el interior del túnel se utilizara una capa de rodadura de 8 cm de espesor colocada sobre la losa intermedia. Por otro lado, la sección tipo del firme a utilizar a cielo abierto es la siguiente:

ENLACE Y BIFURCACIÓN VIARIA	Firme	25 cm hormigón de firme
		25 cm hormigón magro vibrado
	Capa de asiento del firme	25 cm S-EST3
		3

7.7. Plataforma y superestructura

En el presente proyecto, se opta por un sistema de vía en placa continua construida in situ. Este sistema se caracteriza por tener las fijaciones ancladas directamente a la losa de hormigón. Las diferencias entre los distintos tipos dentro de este sistema, como en los anteriores casos, residirán en el tipo de fijación que se use.

La vía en placa es una plataforma con carril fijado mediante un polímero a una cobertura y a una plataforma de hormigón armado. Esta plataforma tiene entre otras ventajas la de asegurar unas condiciones de geometría invariables y de tolerancias muy estrictas de la vía, resolver el problema de la escasez y gran rechazo medioambiental de las canteras de balasto y posibilita la reducción de la altura total del paquete de vía en túneles.

Se usará el carril UIC 54.

El tipo de catenaria varía a lo largo del trazado. Se propone una catenaria rígida de hilo de contacto de cobre.

7.8. Movimientos de tierras

Al tratarse de un túnel de gran diámetro y de una longitud de 2,974 km, la obra de este tramo generará una cantidad muy importante de tierras sobrantes.

En el presente proyecto básico, se lleva a cabo una estimación de las tierras sobrantes a partir de: (i) la sección de excavación del túnel y su longitud, (ii) los volúmenes de tierra sobrantes de los desmontes y (iii) los volúmenes necesarios para rellenar los terraplenes. Se incluye también las tierras generadas en la ejecución del pozo de ataque en la zona de Valldaura.

El balance total de los movimientos de tierras es el siguiente:

		TOTAL EXCAVACION	TOTAL APORTACION
TRAMO 1	Autovía	118.142,28	69.601,56
	R1	30.506,76	10.609,03
	R2	1.961,89	755,74
	R3	34.491,41	10.609,03
TRAMO 2	Túnel	526.250,15	0
TRAMO 3	Bif. Ferrovi.	50.067,22	22.885,70
	Bif. Viaria	14.660,18	25.186,56
		776.079,88	139.647,62

Se concluye que se producirá un exceso de tierras sobrantes que suponen un total de **636.432,25m³** de tierras. Las tierras sobrantes son producto de la excavación de los túneles con explosivos y con tuneladora. Se trata pues de una roca sana que podrá ser aprovechada en otras obras civiles (para rellenar terraplenes, para el balasto, etc.) o para rellenar antiguas canteras. En caso contrario, las tierras sobrantes podrán transportarse a los vertederos en servicio más cercanos descritos en el *anexo 16- Gestión de residuos*.

7.9. Afectaciones sobre la movilidad

Para la correcta ejecución de los trabajos descritos en el Proyecto de la construcción del túnel mixto para ferrocarriles y automóviles entre Horta y el Vallés Occidental. Dichas situaciones se dividen en dos grandes grupos

- Situaciones provisionales durante la obra.
- Situaciones permanentes a adoptar una vez finalizados los trabajos.

Las afectaciones temporales suceden sobre la salida del passeig de la Vall d'Hebron hacia Barcelona y la carretera BV-1415 y sobre el "Camí de cal notari", en Horta.

De forma permanente se verá afectada la calle Germans Desvalls y dos caminos rurales sin pavimentar en el entorno de la boca norte del túnel en Can Cerdà.

En el anexo 15- Desvíos de tráfico se proponen alternativas para cada afectación al tráfico que se generarán debido a la construcción del túnel.

8. ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL

En el presente Proyecto básico se lleva a cabo un Estudio del impacto ambiental. Este estudio tiene por objeto evaluar los efectos producidos en el entorno a como consecuencia de la ejecución y puesta en marcha de las actuaciones planteadas. El estudio de impacto ambiental es el desarrollo técnico de la evaluación ambiental estratégica, de carácter ordinario, a la que está sujeto el presente proyecto.

En primer lugar, se pretende identificar y analizar los efectos mayores producidos tanto durante la construcción del proyecto como durante la explotación de la obra construida. En base a diversos criterios, estos efectos se valoran cualitativamente y, cuando es posible, también cuantitativamente a partir de aproximaciones. En segundo lugar, el estudio presenta medidas correctoras que sirvan de base para el futuro proyecto constructivo.

9. GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DE DEMOLICIÓN

La ejecución de esta obra generará una gran cantidad de residuos que deberán ser gestionados con el fin de minimizar el impacto sobre el entorno.

El *anexo 16 – Gestión de residuos* se expone el procedimiento de gestión de residuos a seguir durante los trabajos de construcción del túnel para ferrocarriles y automóviles entre Barcelona y el Vallès. Se ha tomado como referencia el modelo catalán de gestión de residuos de la construcción de la Agencia de Residus de Catalunya, respetando la normativa vigente.

10. EXPROPIACIONES Y OCUPACIONES TEMPORALES

Dado que para la ejecución de las obras proyectadas es necesaria la ocupación de propiedades particulares cuya expropiación o indemnización es necesaria, es objeto de este anejo el determinar las zonas afectadas, al objeto de aplicar la Ley de Expropiación Forzosa de 16 de Diciembre de 1954 y los Arts. 15 y 16 de su Reglamento.

Se describen en el presente Anejo, información de propiedades y definición de las parcelas a ocupar, como base para iniciar el expediente de expropiación como consecuencia del proyecto de construcción “Túnel mixto para ferrocarriles y automóviles entre Horta y el Vallès Occidental”.

Teniendo en cuenta lo especificado en el *anexo 14 – Expropiaciones y ocupaciones temporales*, se obtiene la siguiente valoración económica en lo que hace a las expropiaciones y ocupaciones temporales de terrenos:

Finca afectada	Municipio	Clase suelo	Uso principal	Área afectada [m²]	Tipo de ocupación	Precio	Importe [€]
89786	Barcelona	Urbano	Suelo sin edificar	440	Permanente	100	44.000
91805	Barcelona	Urbano	Suelo sin edificar	3.100	Permanente	100	310.000
				26.670	Temporal	10	266.700
92827	Barcelona	Urbano	Suelo sin edificar	1.980	Permanente	100	198.000
91822	Barcelona	Urbano	Suelo sin edificar	1.000	Temporal	10	10.000
08266A009	Cerdanyola del Vallès	Rústico	Agrario	1.800	Permanente	10	18.000
				7.200	Temporal	1	7.200

Figura 10. Importe de expropiaciones y ocupaciones temporales a cada parcela.

El presupuesto total de expropiaciones y ocupaciones temporales es de **OCHOCIENTOS OCHO MIL CUATROCIENTOS (808.400 €)**.

11. ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD

El artículo 4 del Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, establece la obligatoriedad de la inclusión de un Estudio de Seguridad y Salud en los proyectos de obras de construcción.

El estudio que se contempla en el *Anejo 19 - Estudio de seguridad y salud* del presente documento tiene como finalidad establecer las bases técnicas para fijar los parámetros de prevención de riesgos de

accidentes y enfermedades profesionales, así como los derivados de los trabajos de reparación, conservación y mantenimiento que se realicen durante el tiempo de garantía, al tiempo que se definen los locales preceptivos de higiene y bienestar de los trabajadores durante la ejecución de las obras del proyecto objeto de este estudio.

En el presente proyecto básico se dan las directrices básicas a la(s) empresa(s) contratista(s) para llevar a cabo su obligación de redacción de un Plan de Seguridad y Salud en el que se analicen, estudien, desarrollen y complementen, en función de su propio esquema de ejecución, las previsiones contenidas en este Estudio. Dicho Plan se presentara antes del inicio de las obras al Coordinador de Seguridad y Salud en fase de ejecución para su aprobación e inicio de los trámites de Declaración de Obertura delante la Autoridad Laboral.

El presupuesto del Estudio de Seguridad y Salud queda recogido en el presupuesto de seguridad y salud (*en el Anejo 19 - Estudio de Seguridad y Salud*) y su importe se incluye en los presupuestos generales (Documento nº4). El presupuesto de ejecución material en materia de seguridad y salud asciende a **TRES MILLONES TREINTA Y DOS MIL NOVENTA Y CUATRO Y DIECISETE CÉNTIMOS (3.032.094,17)**.

12. PLAN DE LA OBRA

El *anejo 17 – Plan de obra* tiene como objetivo presentar el calendario de ejecución de los trabajos desglosado por actividad en el marco del proyecto de la construcción del túnel mixto para ferrocarriles y automóviles entre Horta y el Vallés, definiendo una posible organización de los trabajos de una forma justificada. Se busca optimizar los trabajos para reducir las afectaciones sobre el entorno, es decir: limitar la duración de los desvíos de tráfico y el tiempo de los vecinos sufren las externalidades negativas de las obras.

En este anejo, se proponen los días de inicio y fin de cada una de las actividades que forman parte del proceso constructivo y de los tramos en los que se podría dividir la obra. Estos tramos se han establecido en base a unas características y una sección tipo común.

La programación de las obras que se presente en este anejo tiene un carácter indicativo, ya que los equipos indicados son orientativos en cuanto a los rendimientos y a los plazos de ejecución. Será el contratista adjudicatario de las obras el responsable final de la elaboración de un programa de trabajos detallado y acorde con los recursos humanos y de maquinaria de los que éste disponga.

La duración estimada de la obra es de 49 meses, iniciándose el 12 de enero de 2018 y finalizando el 1 de febrero de 2022.

13. PLAN DE CONTROL DE CALIDAD

El *Anejo 20 - Plan de control de calidad* recoge las principales acciones que deberán llevarse a cabo durante el Plan de Control de Calidad para el proyecto del Túnel mixto para ferrocarriles y automóviles entre Horta y el Vallés Occidental. La finalidad final del Plan es definir las operaciones de control necesarias durante la ejecución de las obras para alcanzar los niveles de calidad exigidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas del presente proyecto.

En estricto cumplimiento de la normativa vigente se redacta este anejo, en el cual se identifican las unidades que deben ser objeto de control, del tipo de control, su frecuencia y el número de ensayos a llevar a cabo.

El presupuesto para el control de calidad asciende a **DOS MILLONES SETECIENTOS ONCE MIL (2.711.000,00 €)**.

14. PROPUESTA PARA LA LICITACIÓN

14.1. Clasificación del contratista

De acuerdo con el artículo 25 del Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas, se deberán exigir las siguientes clasificaciones al/los contratista(s) o que este(s) acredite(n) la subcontratación de la actividad relacionada con dicha clasificación (de conformidad con el director de obra) a una empresa con dicha clasificación:

Grupo A: Movimiento de tierras y perforaciones

Subgrupo 5. Túneles.

Categoría F

Grupo B: Movimiento de tierras y perforaciones

Subgrupo 5. Estructuras de hormigón armado.

Categoría F

Grupo D: Ferrocarriles

Subgrupo 1. Tendido de vías. - categoría F

Subgrupo 4. Electrificación de ferrocarriles. - categoría F

Subgrupo 5. Obras de ferrocarriles sin cualificación específica. - categoría F

14.2. Revisión de precios

La obra tiene un plazo de ejecución superior a un año. Por consiguiente, y en cumplimiento del artículo 77 de la Ley 2/2015, de 30 de marzo, sobre los contratos en el sector público, el proyecto deberá someterse a la revisión de precios.

Se aplicarán las fórmulas del Real Decreto 1359/2011, de 7 de octubre, por el que se aprueba la relación de materiales básicos y las fórmulas-tipo generales de revisión de precios de los contratos de obras y de contratos de suministro de fabricación de armamento y equipamiento.

A continuación, la fórmula de revisión de precios de túneles ejecutados con tuneladora:

$$K_t = 0,01 \frac{B_t}{B_o} + 0,08 \frac{C_t}{C_o} + 0,16 \frac{E_t}{E_o} + 0,02 \frac{P_t}{P_o} + 0,02 \frac{Q_t}{Q_o} + 0,07 \frac{R_t}{R_o} + 0,12 \frac{S_t}{S_o} + 0,02 \frac{T_t}{T_o} + 0,01 \frac{U_t}{U_o} + 0,49$$

Fuente: Real Decreto 1359/2011

Donde,

K_t	Coefficiente teórico de revisión para el momento de la ejecución t
B_o	Índice de coste de materiales bituminosos en la fecha de licitación
B_t	Índice de coste de materiales bituminosos en el momento de la ejecución t
C_o	Índice de coste de cemento en la fecha de licitación
C_t	Índice de coste de cemento en el momento de la ejecución t
E_o	Índice de coste de la energía en la fecha de licitación
E_t	Índice de coste de la energía en el momento de la ejecución t.
P_o	Índice de coste de los productos plásticos en la fecha de licitación
P_t	Índice de coste de los productos plásticos en el momento de la ejecución t.
Q_o	Índice de coste de los productos químicos en la fecha de licitación
Q_t	Índice de coste de los productos químicos en el momento de la ejecución t.
Q_o	Índice de coste de los áridos y rocas en la fecha de licitación
Q_t	Índice de coste de los áridos y rocas en el momento de la ejecución t.
S_o	Índice de coste de materiales siderúrgicos en el momento de licitación.
S_t	Índice de coste de materiales siderúrgicos en el momento de la ejecución t.
T_o	Índice de coste de materiales electrónicos en el momento de licitación.
T_t	Índice de coste de materiales electrónicos en el momento de la ejecución t.
U_o	Índice de coste de cobre en el momento de licitación.
U_t	Índice de coste de cobre en el momento de la ejecución t.

15. PRESUPUESTO

Como resultado de este proyecto básico, se calcula el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) para la obra túnel mixto de ferrocarriles y automóviles entre Barcelona y el Vallés Occidental.

1. POZO DE ATAQUE	7.876.849,41
2. ENLACE VALLDAURA	4.069.857,30
3. TÚNEL	225.901.776,00
4. POZO DE EXTRACCIÓN	3.625.447,39
5. BIFURCACION FERROVIARIA	1.508.021,62
6. BIFURCACIÓN VIARIA	820.979,00
7. ESTUDIO SEGURIDAD Y SALUD	3.032.094,17
8. GESTIÓN DE RESIDUOS	17.000.000,00
9. CONTROL DE CALIDAD	2.711.000,00
10. ACCIÓN CULTURAL	3.000.000,00
11. PROCEDIMIENTOS LEGALES	1.000.000,00
TOTAL	270.546.024,89

El presupuesto de ejecución material de las obras del presente proyecto asciende a DOSCIENTOS MILLONES QUINIENTOS CUATENTA Y SEIS MIL VEINTI CUATRO Y OCHENTA Y NUEVE CÉNTIMOS (270.546.024,89 €)

El presupuesto base de licitación resulta de incrementar el presupuesto de ejecución material con el 13% de gastos generales y el 6% de beneficio industrial. Al resultado final se le debe aplicar un 21% de I.V.A. el presupuesto base de licitación resulta TRES CIENTOS OCHENTA Y NUEVE MILLONES QUINIENTOS CINCUENTA Y NUEVE MIL DOS CIENTOS VEINTIUNO Y VEINTICUATRO CÉNTIMOS (389.559.221,24 €)

Las expropiaciones e indemnizaciones por ocupación temporal del terreno que deberán producirse para la ejecución de las obras del presente proyecto se encuentran justificadas en el *anejo 14 – Expropiaciones y ocupaciones temporales del terreno*. El importe total asciende a OCHOCIENTOS OCHO MIL CUATROCIENTOS (808.400 €).

Sumando las expropiaciones al presupuesto base de licitación se obtiene el presupuesto para conocimiento de la Administración, que asciende a la cantidad de **TRES CIENTOS NOVENTA MILONES TRESCIENTOS SESENTA Y SIETE MIL SEISCIENTOS VEINTIUNO Y VEINTE CÉNTIMOS (390.367.621,20 €)**

16. DOCUMENTOS QUE COMPRENDE EL PROYECTO

Documento nº1: Memoria y Anejos

Memoria

Anejos a la memoria

ANEJO nº1: Análisis de la situación actual

ANEJO nº2: Topografía

ANEJO nº3: Geología

ANEJO nº4: Climatología

ANEJO nº5: Hidrología y drenaje

ANEJO nº6: Estudio de las alternativas

ANEJO nº7: Tráfico

- ANEJO n°8: Trazado
- ANEJO n°9: Túnel
- ANEJO n°10: Estructuras
- ANEJO n°11: Firme y pavimento
- ANEJO n°12: Plataforma y superestructura
- ANEJO n°13: Movimiento de tierras
- ANEJO n°14: Expropiaciones y ocupaciones temporales
- ANEJO n°15: Desvíos de tráfico
- ANEJO n°16: Gestión de residuos
- ANEJO n°17: Plan de obra
- ANEJO n°18: Estudio de impacto ambiental
- ANEJO n°19: Estudio de Seguridad y salud
- ANEJO n°20: Plan de control de calidad
- ANEJO n°21: Justificación de precios
- ANEJO n°22: Presupuesto para el conocimiento de la administración

Documento n° 2 Planos

- 1. PLANOS GENERALES
 - 1.1. Localización geográfica del proyecto
 - 1.2. Plano de situación
 - 1.3. Topografía del terreno. Curvas de nivel
- 2. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS
 - 2.1. Plano de alternativas
 - 2.2. Alternativa 1
 - 2.2.1. Planta general
 - 2.2.2. Trazado por tramos
 - 2.3. Alternativa 2
 - 2.3.1. Planta general
 - 2.3.2. Trazado por tramos
 - 2.4. Alternativa 3
 - 2.4.1. Planta general
 - 2.4.2. Trazado por tramos
 - 2.5. Alternativa 4
 - 2.5.1. Planta general
 - 2.5.2. Trazado por tramos
- 3. SOLUCIÓN ADOPTADA
 - 3.1. Plano general en planta
 - 3.2. TRAMO 1. Enlace Barcelona
 - 3.3. TRAMO 2. Túnel
 - 3.4. TRAMO 3. Bifurcación

4. PLANOS DE TRAZADO. PERFILES
 - 4.1. Enlace
 - 4.2. Túnel
 - 4.2.1. Trazado en alzado
 - 4.2.2. Planta y perfil longitudinal
 - 4.3. Bifurcación
 - 4.3.1. Ferrocarril
 - 4.3.2. Autovía
5. SECCIONES TIPO
 - 5.1. Secciones tipo enlace Barcelona
 - 5.1.1. Plano de situación
 - 5.1.2. Sección tipo tronco común ramales R1 y R2
 - 5.1.3. Sección tipo ramal R1
 - 5.1.4. Sección tipo viaducto ramal R2
 - 5.1.5. Sección tipo ramal R3
 - 5.1.6. Sección tipo carretera
 - 5.1.7. Sección tipo boca sur
 - 5.2. Secciones tipo túnel
 - 5.2.1. Sección tipo túnel en alineación recta
 - 5.2.2. Sección tipo túnel en alineación curva
 - 5.3. Secciones tipo bifurcación
 - 5.3.1. Plano de situación
 - 5.3.2. Sección tipo boca norte. Solución en pérgola tramo 1
 - 5.3.3. Sección tipo boca norte. Solución en pérgola tramo 2
 - 5.3.4. Sección tipo vía en placa a cielo abierto
 - 5.3.5. Sección tipo carretera viaducto
 - 5.3.6. Sección tipo carretera terraplén/desmonte
6. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS
 - 6.1. TRAMO 1. Enlace Barcelona
 - 6.1.1. Viaducto ramal R2
 - 6.1.2. Pozo de ataque de la tuneladora
 - 6.1.3. Base de obras boca sur
 - 6.2. TRAMO 2. Túnel
 - 6.2.1. Placas alveolares de losa intermedia
 - 6.2.2. Armadura de las dovelas
 - 6.2.3. Galería de evacuación
 - 6.3. TRAMO 3. Bifurcación
 - 6.3.1. Base de obras boca norte
 - 6.3.2. Pozo de extracción de la tuneladora

Documento nº3: Pliego de condiciones técnicas particulares

Documento nº4: Presupuesto

Mediciones
Cuadro de precios número 1
Cuadro de precios número 2
Presupuesto
Resumen de presupuesto
Última hoja

17. CONCLUSIONES

Con todo lo expuesto en esta memoria, junto con los otros documentos que constituyen el proyecto, se considera que se verifican los objetivos de su redacción y se somete a la aprobación de los organismos competentes.

Barcelona, Septiembre de 2017

La ingeniera autora del proyecto abajo firmante,

Cristina Aguado Díaz

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos